

ЭПТ 2018



ACED 2018

УДК 621.314.26

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ФУНКЦИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ «ЭРАТОН-В» С КАСКАДНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ Н-МОСТОВ

THE SPECIAL FUNCTIONALITIES OF THE MULTILEVEL CASCEDED H-BRIDGE FREQUENCY CONVERTERS «ERATON-V»

Клан Виктор Александрович, генеральный директор ЗАО «ЭРАСИБ», Россия, 630088, г. Новосибирск, ул. Сибиряков-Гвардейцев, 51/3. E-mail: klan.v@erasib.ru. Тел.: +7-(383)-383-07-96

Вдовин Владимир Владимирович, канд. техн. наук, начальник группы разработчиков ЗАО «ЭРАСИБ», Россия, 630088, г. Новосибирск, ул. Сибиряков-Гвардейцев, 51/3. E-mail: vdovin.v@erasib.ru. Тел.: +7-(383)-342-57-59

Нос Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент каф. «Проектирование технологических машин» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: nos@corp.nstu.ru. Тел.: +7-(383)-346-11-77

Кучер Екатерина Сергеевна, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: kucher@corp.nstu.ru. Тел.: +7-(383)-346-15-68

Вислогузов Денис Петрович, аспирант каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: VisloguzovDenis@mail.ru. Тел.: +7-(383)-346-15-68

Viktor A. Klan, General manager of the industrial company «ERASIB», 630088, Sibiriyakov-Gvardeytshev, 51/3, city Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: klan.v@erasib.ru. Ph.: +7-(383)-383-07-96

Vladimir V. Vdovin, Cand. Sc., Industrial company «ERASIB», 630088, Sibiriyakov-Gvardeytshev, 51/3, city Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: vdovin.v@erasib.ru. Ph.: +7-(383)-342-57-59

Oleg V. Nos, Doctor Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, Prospekt K. Marks, 20, city Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: nos@corp.nstu.ru. Ph.: +7-(383)-346-11-77

Ekaterina S. Kucher, Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, Prospekt K. Marks, 20, city Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: kucher@corp.nstu.ru. Ph.: +7-(383)-346-15-68

Denis P. Visloguzov, postgraduate student, Novosibirsk State Technical University, 630073, Prospekt K. Marks, 20, city Novosibirsk, Russian Federation. E-mail: VisloguzovDenis@mail.ru. Ph.: +7-(383)-346-15-68

Аннотация: В докладе представлена краткая информация о специализированных сервисных функциях выпускаемого ЗАО «ЭРАСИБ» г. Новосибирск многоуровневого преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-В» с каскадным включением Н-мостов, который предназначен для работы в составе регулируемых электроприводов переменного тока среднего класса напряжений 3-10 кВ в диапазоне мощностей трехфазной электрической машины 1-10 МВт.

Abstract: The report is devoted to describe the special functionalities of multilevel frequency converter «ERATON-V» with series-connected H-bridge voltage-source inverter produced the industrial company «ERASIB», city Novosibirsk, which is untended for variable-speed AC three-phase drives rated at 3-10 kV and 1-10 MW.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод переменного тока; преобразователь частоты; многоуровневый инвертор на базе Н-мостов; система векторного управления.

Key words: variable-frequency AC electric drive; frequency converter; cascaded H-bridge multilevel voltage-source inverter; speed vector control.

ВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из наиболее эффективных путей расширения областей практического применения регулируемого электропривода переменного тока на диапазоны мощностей 1-10 МВт и средний класс напряжений 3-10 кВ является использование многоуровневых топологий автономного инвертора, которые могут быть выполнены на основе схемотехнических решений с фиксированной нейтральной точкой (neutral point clamped inverter), с плавающими конденсаторами (flying

capacitors inverter), а также в виде последовательного (series-connected H-bridge inverter) или иначе каскадного включения Н-мостов (cascaded H-bridge inverter) [1]. Учитывая достаточно высокую стоимость данного типа силового преобразовательного устройства, к его системе управления предъявляются дополнительные требования, связанные как с повышением надежности силовых цепей, например, за счет аппаратного или алгоритмического резервирования, так и с реализацией дополнительных сервисных функций.

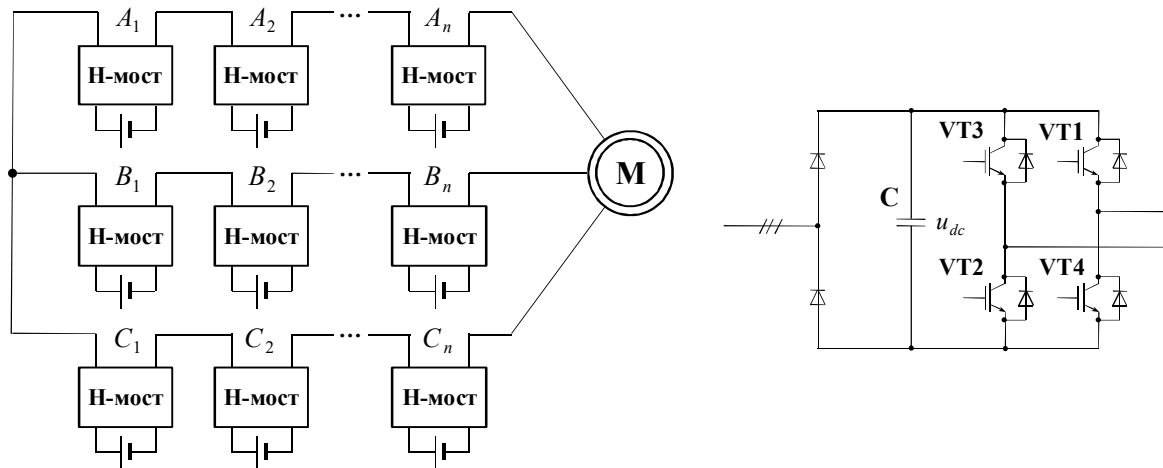


Рис. 1. Упрощенная силовая схема многоуровневого инвертора на базе Н-мостов и одной силовой ячейки

МНОГУОУРОВНЕВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ТИПА «ЭРАТОН-В»

Силовая схема серийно выпускаемого ЗАО «ЭРАСИБ», г. Новосибирск многоуровневого преобразователя частоты типа «ЭРАТОН-В» представляет собой последовательное соединение n идентичных Н-мостов в каждой из трех фаз, конкретного количество которых зависит от номинальной величины напряжения питания исполнительного двигателя переменного тока (рис. 1), благодаря чему значительно улучшается гармонический состав выходных сигналов, используются только низковольтные полупроводниковые приборы, а также снижаются суммарные затраты на производство и ремонт за счет модульной структуры автономного инвертора [2]. Каждая из силовых ячеек включает в себя непосредственно Н-мост, неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель (рис. 2), либо, по специальному исполнению, активный выпрямитель, вход которых подключается к соответствующим вторичным обмоткам понижающего трансформатора, в результате чего фазное напряжение на обмотке двигателя $j = A, B, C$ будет определяться по формуле

$$u_j = u_{dc} \sum_{k=1}^n S_k,$$

здесь u_{dc} – напряжение звена постоянного тока силового модуля (рис. 1); S_k – переключающие функции k -ого Н-моста, принимающего значения +1, 0 или –1.

Управление текущим состоянием IGBT-модулей осуществляется при помощи скалярной ШИМ с горизонтальным сдвигом треугольных опорных сигналов [3] и предискажением нулевой составляющей. В соответствии с данным подходом, модулирующие функции двух стоек одного и того же Н-моста находятся в противофазе, а угловое смещение между последовательно включенными n силовыми ячейками составляет $\Delta = 180^\circ \cdot n^{-1}$ [4]. Техническая реализация данного закона коммутации позволяет добиться увеличения эквивалентной частоты переключения до уровня [5]

$$f = 2nT^{-1},$$

здесь $T = \text{const}$ – период квантования по времени задающего воздействия в блоке ШИМ,

улучшая, таким образом, гармонический состав потребляемого от распределительной сети трехфазного тока, а также обеспечить равномерное распределение электромагнитной энергии между звеньями постоянного тока.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ

В зависимости от конкретных требований, предъявляемых к статическим и динамическим характеристикам электропривода переменного тока, «ЭРАТОН-В» может осуществлять регулирование частоты вращения ротора в классе модифицированного разомкнутого управления, поддерживающего постоянство отношения u/f с учетом компенсации различного рода возмущающих воздействий и перекрестных связей, или в соответствии с принципом векторного управления [6], как с датчиком на валу, так и при помощи использования специальной динамической подсистемы вычисления скорости на основе прямых измерений трехфазных переменных [7]. Для непосредственного полеориентирования в рамках последнего подхода, в управляющем устройстве многоуровневого преобразователя частоты применяется адаптивный наблюдатель магнитного состояния, обеспечивающий текущую оценку модуля вектора потокоцеплений ротора и его направляющих косинусов. В целях автоматической настройки двухканальной системы подчиненного регулирования на желаемые показатели качества переходных процессов и требуемую статическую точность, в «ЭРАТОН-В» применяются алгоритмы предварительной идентификации параметров одной фазы схемы замещения электрической машины, которые в дальнейшем используются при расчете численных значений соответствующих регуляторов и наблюдателя. Помимо этого, благодаря наличию универсальных цифровых последовательных каналов (RS-485, протокол Modbus), силовое преобразовательное устройство может встраиваться в иерархические структуры более высокого уровня, обеспечивая, таким образом, стабилизацию какого-либо технологического параметра, в том числе и при регулировании с постоянством длительнодопустимой мощности (II зона регулирования).

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ФУНКЦИИ «ЭРАТОН-В»

Многоуровневый преобразователь частоты «ЭРАТОН-В» обладает улучшенным по отношению к отечественным и зарубежным аналогам перечнем специализированных опций, позволяющих адаптировать его применение под конкретные условия эксплуатации и требования заказчика, в число которых входит:

1. Автоматическое переключение питания исполнительного двигателя переменного тока от сило-

вого преобразовательного устройства на сеть и обратно.

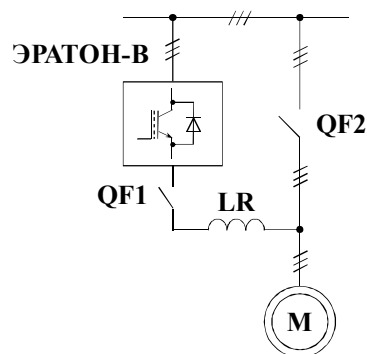


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема переключения питания двигателя

Практическая реализация данного условия сопровождается необходимостью ограничения возникающих при одновременном замыкании автоматических выключателей **QF1** и **QF2** уравнильных токов, что иллюстрирует рис. 2, амплитудные значения которых могут вызывать срабатывание соответствующих защит и, как следствие, аварийное отключение электромеханической системы.

Для исключения указанного выше недостатка на начальном этапе коммутационных процессов в «ЭРАТОН-В» выполняется синхронизация соответствующих потенциалов автономного инвертора по основной гармонике относительно сети при помощи коррекции управляющих воздействий в каналах намагничивания и моментобразования электрической машины [8]. Данная предварительная автоподстройка полностью исключает броски токов при переключении во время параллельной работы двух источников, а также позволяет значительно уменьшить величину индуктивности и массогабаритные показатели уравнильного реактора **LR** [9].

2. Поддержание работоспособности электропривода без значительного ухудшения качества регулирования угловой скорости вала при кратковременных «просадках» или отключениях централизованного электроснабжения.

В случае непродолжительных сбоев во внешнем питании «ЭРАТОН-В» в течение 1...10 с, электрическая машина переводится в генераторный режим и контур скорости, за счет изменения величины уставки и организации соответствующего канала обратных связей, осуществляет стабилизацию усредненного значения всех n напряжений конденсаторных батарей силовых ячеек U_{dc} , благодаря чему при восстановлении работоспособности распределительной сети происходит возврат к нормальному режиму работы электропривода без существенной потери качества процессов по частоте вращения ротора. Помимо этого, данная опция может быть использована для «плавного» торможения двигателя без применения дополнительного комплекта резистивных станций за счет

рассеивания запасенной в маховых массах кинетической энергии в виде тепловых потерь на активных сопротивлениях трехфазной силовой цепи. 3. Выравнивание токов трехфазных двигателей, работающих на общую нагрузку.

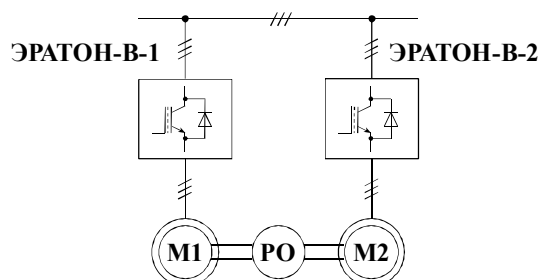


Рис. 3. Функциональная схема двухдвигательного электропривода с выравниванием моментов

В многодвигательных приложениях с единым рабочим органом **ПО** (рис. 3), специальный алгоритм коррекции задающих воздействий на внешние контура скорости двух или более взаимосвязанных «ЭРАТОН-В» позволяет устранить перегрев электрических машин вследствие неравномерности распределения электромагнитных моментов **M1** и **M2**.

4. Опция «байпас», поддерживающая процесс регулирования скорости в аварийных ситуациях, сопровождаемых выходом из строя элементов в составе одной или более силовых ячеек.

Наличие внутренней неисправности в силовой схеме многоуровневого преобразователя частоты будет приводить к уменьшению выходного напряжения соответствующей стойке автономного инвертора, вследствие чего будет наблюдаться неравномерность вращения ротора, а также потеря активной мощности на валу. В этой связи для обеспечения симметричного гармонического закона изменения токов в фазных обмотках электрической машины, на начальном этапе осуществляется бесконтактное шунтирование неработоспособного модуля, а затем система управления реализует алгоритмическое смещение нулевого потенциала «ЭРАТОН-В» относительно гальванически развязанной средней точки двигателя за счет предсказания модулируемых функций блока ШИМ. Несмотря на некоторое снижение верхней границы диапазона регулирования, данная функция позволяет значительно повысить надежность «ЭРАТОН-В», что имеет важное прикладное значение для особо ответственных приложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в данном докладе функциональные опции многоуровневого преобразователя частоты «ЭРАТОН-В» с каскадным включением H-мостов, реализуемые в рамках соответствующих

алгоритмических решений без привлечения дополнительных аппаратных средств, позволяют значительно расширить области практического применения электроприводов переменного тока на базе трехфазных двигателей среднего класса напряжений 3-10 кВ, обеспечивая регулирование скорости в бездатчиковом исполнении во всех 4-х квадрантах плоскости механических характеристик, в том числе и применительно к объектам с повышенными требованиями по надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rodriguez J., Franquelo L. G., Kouro S., Leon J. I., Portillo R. C., Prats M. A. M., Perez M. A. Multilevel Converters: An enabling technology for high-power applications // *Proceeding IEEE*. 2009. Vol. 97, № 11. P. 1786–1817.
2. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Pérez M. A., Leon J.I. Recent advances and industrial applications of multilevel converters // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, № 8. P. 2553–2580.
3. Дыбко М. А., Брованов С. В., Нос О. В. Гармонический анализ выходного напряжения параллельных многоуровневых преобразователей с фиксирующими диодами при различных способах ШИМ // *Электротехника*. 2015. №8. С. 6–11.
4. Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J., Pérez M. A. A survey on cascaded multilevel inverters // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2010. Vol. 57, № 7. P. 2197–2206.
5. Mora A., Juliet J., Santander A., Lezana P. Dead-time and semiconductor voltage drop compensation for cascaded H-bridge converters // *IEEE Transactions on industrial electronics*. 2016. Vol. 63, № 12. P. 7833–784.
6. Нос О.В. Математические модели преобразования энергии в асинхронном двигателе: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 168 с.
7. Клан В. А., Вдовин В. В., Кучер Е. С., Нос О. В. Полупроводниковые преобразователи частоты серии «ЭРАТОН-ФР» // IX Международная (XX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу. Пермь 2016. С. 284–286.
8. Nos O., Radel U., Starostina L. The synchronous switching of motor power supply from frequency converter to grid for an ac drives with field-oriented vector control // *The 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017: proceedings*. Erlagol, Altai, Russia, 2017. P. 511–515.
9. Nos O.V. Synchronization algorithm for three-phase voltages of an inverter and a grid // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2017. Vol. 53, № 4. P. 364–370.